

焊接技术在航空航天工业中的应用和发展建议

Application and Development Proposal of Welding Techniques in
Aerospace Industry

北京航空航天大学机械工程与自动化学院 王亚军
北京航空制造工程研究所 卢志军



王亚军

北京航空制造工程研究所副所长, 自然科学研究员。北京航空航天大学机械制造与自动化专业在职博士。中国机械工程学会理事。长期从事焊接及制造技术研究。先后主持负责各类科研课题 10 多项, 获部级以上科技进步奖 10 多项, 申请发明专利 3 项, 在国际国内会议及刊物上发表论文及翻译论文 20 余篇, 参加编写有关专业书籍 3 部。

焊接是现代制造工业中不可或缺的加工手段, 是将两种或者两种以上材料(同种或者异种)通过原子或分子间的结合和扩散形成永久性连

“大飞机”计划、拥有自主知识产权的 ARJ21 飞机、“神七”宇宙飞船、“嫦娥奔月”计划、载人航天工程、新一代大型运载火箭及新型卫星等航空航天型号的需求, 牵引着航空航天焊接技术的发展, 先进焊接技术在航空航天中的应用也必然推动航空航天型号的发展。

接的工艺流程。根据焊接时金属连接的冶金特点, 也可以把焊接工艺分为液相焊接、固相焊接、固-液相焊接 3 类^[1]。

焊接技术是连接技术中的一部分, 是制造技术的重要组成部分, 同时也是航空飞机、航空航天发动机、箭弹星船体结构、容器、管路和一些精密器件制造中不可缺少的技术。在现代生产和制造领域中, 越来越多的产品采用各种焊接方法把不同材料、形状、结构和功能的零部件连接成一个复杂的整体, 大大简化了构件整体加工的工序, 节省了材料, 提高了生产效率^[2]。

在航空飞机、发动机和航天器的研制和生产中, 焊接技术已经成为主导工艺方法之一。焊接技术的进步

与发展不仅能够减轻飞机、发动机的重量, 而且还为航空飞机、发动机以及航天器结构设计提供技术支持, 促进航空飞机、发动机性能的提高^[3-6]。

焊接技术在航空工业中的应用

1 国外情况

各种焊接技术广泛用于航空发动机结构中。焊接结构件在喷气发动机零部件总数中所占比例已超过 50%, 焊接的工作量占发动机制造总工时的 10% 左右。在飞机结构中, F111 的机翼支承梁(钢结构), “狂风”、F14 的钛合金中央翼盒、机翼盒形梁及整体壁板等结构上采用了焊接技术。F22 后机身前、后梁采用了热等静压钛合金铸件的电子束焊接

结构,原苏联 20 世纪 60 年代研制的米格-25 机体结构的 80% (结构重量) 是焊接,焊缝长达 4000 多 m,焊点达到 140 万个。俄罗斯凭借其高水平的焊接技术、系统的焊接结构研究成果,将结构设计、选材和焊接技术的发展(基础研究)紧密结合,在飞机制造中大量采用焊接技术,70 年代初研制出的苏-27 飞机极具代表性,焊接技术的应用几乎遍及全机,除了常规的 TIG 焊用于飞机导管、某些铝合金构件;点焊用于蒙皮、组合梁、框等零件的高强铝合金构件焊外,广泛采用焊接新技术,如电子束焊、穿透焊、双弧焊、高频感应组装钎焊、潜弧焊等,焊接部件达到 800 多个,零件达数千件^[5]。

(1) 电子束焊接技术。

80 年代初,西方国家为了满足研制高水平、高性能飞机的需求,制造商越来越多地采用焊接结构,其中电子束焊接作为一种先进焊接技术,已广泛应用于飞机主要承力构件的制造。其中,以格鲁门公司为代表,他们认为机械加工后进行电子束焊接是制造起落架、飞机大梁和结构骨架的一种正确方法。

与此同时,应用材料也发生了极大的变化,特别是钛合金零件已经走出了小型薄壁件、整体成形钣金和仅承担输送液体的管筒件三方面次要构件的领域,不断地被制成承担一定载荷的结构件,如飞机翼盒的承力支撑架、机身副支撑梁和发动机机架等。这些结构已在被美国号称为“全钛飞机”的舰载机 F-16、F-19 和前苏联的 SU-27 中得到实际应用,目前在 SU-34、FY-22 和 FY-24 中大量使用;不仅在战斗机,而且在民用飞机上,如波音的起落架和空客 A380 的发动机机架上都有使用的先例。由于钛合金的材料特性,这些结构必须在保护气氛或真空室内焊接,这正是电子束焊接技术应用的重要领域。

盘和毂是构成航空发动机转子的重要零件,一个盘毂组合件往往由几级盘和(或)几级毂通过焊接或螺栓连接而成。真空电子束焊接由于具有焊接质量高、焊接变形小等一系列优点而广泛应用于航空发动机盘毂组合的焊接中^[7-9]。

进入 21 世纪,电子束焊接已经成为大型飞机制造公司的标准配置,是制造飞机主、次承力结构件和机翼骨架的必选技术,也是衡量飞机制造水平的一把标尺。国外电子束焊接设备、技术已经相当成熟,成熟的电子枪配以先进的逆变式高压电源,保证了航空产品电子束焊接的高质量要求。

(2) 激光焊接技术。

如果说电子束焊接技术主要用于主、次承力件和钛合金材料的焊接,那么激光焊接技术则大量应用于大尺寸和超大尺寸有色金属的拼合焊接,这些已在空客民用机和美国的 C-5 “银河”飞机上得到证实。

激光焊接具有能量密度高、热影响区小、空间位置转换灵活、可在大气环境下焊接、焊接变形极小等优点。它主要用于飞机大蒙皮的拼接以及蒙皮与长桁的焊接,以保证气动面的外形公差。另外在机身附件的装配中也大量使用了激光焊接技术,如腹鳍和襟翼的翼盒。近年来,激光焊接也多用于薄壁零件的制造中,如进气道、波纹管、输油管道、变截面导管和异型封闭件等。

美国在 20 世纪 70 年代初,就已经利用 15kW CO₂ 激光器针对飞机制造业中的各种材料、零部件进行焊接试验、评估及工艺的标准化。在欧盟各国家中,意大利首先于 20 世纪 70 年代末,从美国引进 15kW CO₂ 激光器。随后从 20 世纪 80 年代中后期开始,由欧盟对航空发动机、航天工业中的各种容器及轻量化结构立项,开展了长达 8 年的激光焊接应用研究,材料涉及钛合金、镍基、铁基

高温合金^[10]。

近年来激光焊接新的应用成果是,用激光焊接技术取代传统的铆钉进行铝合金飞机机身的制造从而减轻飞机机身重量近 20%,提高强度近 20%。德国宇航公司 MBB 将激光焊接用于飞机机身、机翼与内隔板和加强筋的全部连接,取代了原有的铆接工艺,被德国宇航界称为航空制造业中的一大技术革命。空中客车公司经过 8 年努力,成功地采用激光焊接技术代替铆接技术,实现了 A340 飞机的全部铝合金内隔板的激光加工,使机身的重量减轻了 18%,制造成本降低了近 25%,随后又将激光焊接加工技术推广应用到 A318、A380 飞机^[10]。

(3) 搅拌摩擦焊接技术^[11-12]。

搅拌摩擦焊工艺是由英国焊接研究所(TWI)于 1991 年发明的,是一种通过机械变形连接金属的固态处理工艺。它的优点是无飞溅,无需焊接材料,不需要保护气体,接头无气孔、裂纹、杂质等缺陷,焊缝热影响区小,残余应力低,焊接区域组织变化小。焊缝强度相当于电弧焊焊缝强度的 1.3~1.5 倍,疲劳寿命与铆接壁板相当,可焊接的材料厚度为 1.2~55mm。特别是搅拌摩擦焊可焊接各种铝镁合金材料,如 Al-Cu、Al-Mg、Al-Mg-Si、Al-Zn、Al-Li 等高强铝合金,同时也能得到优良的焊接接头。因此搅拌摩擦焊具有广泛的应用前景,已在航空航天工业中,尤其是在航空铝合金焊接中得到广泛的应用。

现在欧洲的戴姆勒-克莱斯勒空中客车公司正在研究用搅拌摩擦焊的挤压型材对接接头来代替飞机机身的这些纵向连接接头,同时,在环向连接上,采用框架间搅拌摩擦焊来代替铆钉连接。

美国 Eclipse 公司在 2003 年交付使用的 Eclipse N 500 中小型商用客机,其机身基本上全部利用搅拌

摩擦焊制造,其中包括飞机蒙皮、翼肋、弦状支撑、飞机地板以及结构件的装配等。美国 Eclipse 公司成功地将搅拌摩擦焊接技术应用到航空工程领域,70% 的铆接被焊缝替代,不仅极大地提高了连接质量,而且使生产效率提高了近 10 倍,大大地降低了生产成本。

波音公司将搅拌摩擦焊接技术应用到 C-17 “空中霸主 3” 军用运

其他焊接技术在航空领域也得到了相应的应用和发展,例如,在美国、加拿大、欧洲,中频电阻焊已经被广泛用于高品质的焊接系统中。钎焊、弧焊等传统焊接工艺仍然广泛用于航空结构件的制造和生产上。

2 国内情况

国内焊接技术在飞机及发动机上的应用与国外相比还有很大差距,但近年来也取得了长足进步。

有高强度钛合金^[14]。因此传统的弧焊工艺无法满足要求,需要先进的焊接技术。另外,中国一航第一飞机设计研究院、西飞公司和北京航空制造工程研究所合作,已经将激光焊接技术成功地应用于某型飞机的钛合金腹鳍的焊接。

针对航空发动机的环形板件、薄壁筒形件、机械加工工件圆周对接环焊缝、纵焊缝的自动氩弧焊接,成都焊研科技有限责任公司在美国 Jetline 公司 9500 控制器的基础上进行二次开发,结合自身在弧焊控制方面的最新研究成果,研制出一种专门用于航空产品的弧焊控制系统。

此外,国内发动机行业通过多个型号的实践,焊接技术已取得较大的进步,许多新工艺如 EBW、IFW、VB、自动氩弧焊、轨迹氩弧焊和弧焊机器人、SPF/DB、PAW 及低应力无变形焊接技术等均得到了应用。

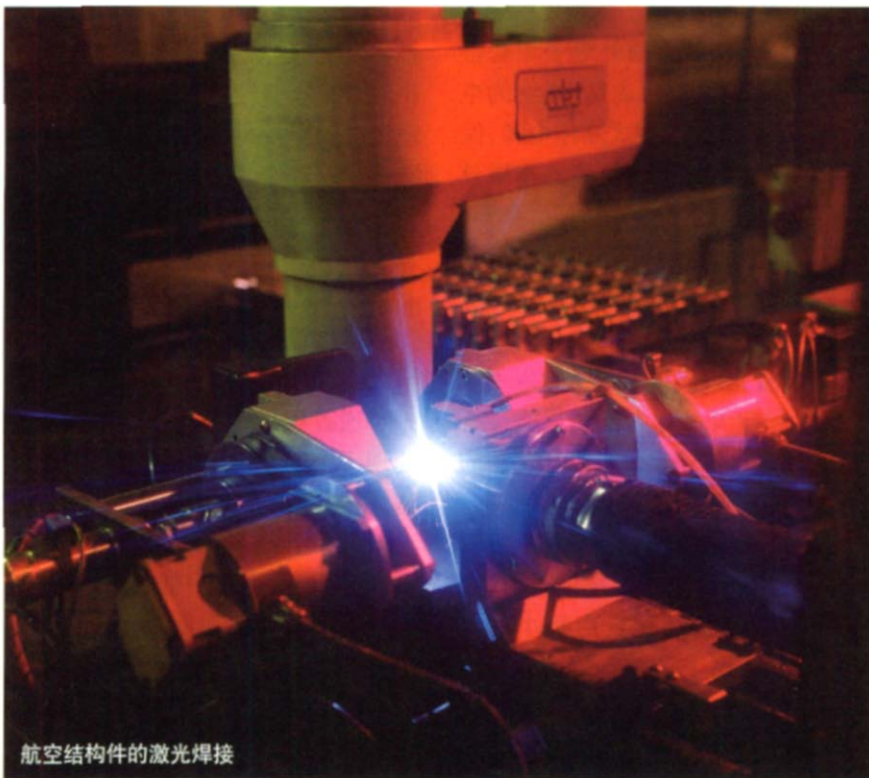
焊接技术在航天工业中的应用

1 国外情况

从德国 V2 火箭诞生到美俄航天飞机成功上天,美国和前苏联为增加空间飞行器的运载能力,承担空间运输任务,积极设计先进的航天飞行器。为实现这一目标,两国研究了在低温燃料工作条件下具有高强度、可焊性好的铝锂合金。焊接技术随着航天结构材料的更新换代而不断向前发展,已由最初的钨极氩弧焊发展到今天的钨极氦弧焊、局部真空电子束焊、变极性等离子弧焊和搅拌摩擦焊等。从焊缝金属成形本质而言,已由最初的熔焊凝固结晶成形发展到固相连接塑性成形,从而使焊缝质量得到提高。

(1) 搅拌摩擦焊技术^[15-16]。

英国发明、美国已用于 Delta 火箭推进储箱的搅拌摩擦焊工艺,由于其焊接过程固有的特点,在未来铝合金储箱等航天结构中将有极好的应



航空结构件的激光焊接

输机地板的制造中,生产效率是原来铆接的 10 倍。空中客车公司已经开始将搅拌摩擦焊接应用于大型民用飞机的制造中。2005 年 8 月 26 日,据《SpeedNews》报道,空客已经致力于将搅拌摩擦焊接技术引入到 A340 飞机制造中,并大规模应用于 A350 的制造,到 2007 年,空客公司将搅拌摩擦焊接技术用于 A340-500s 及 A340-600s 的机身纵缝连接,以取代传统的铆接技术。空客公司声称,使用搅拌摩擦焊接技术代替铆接技术制造飞机机身,每米焊缝能够减轻重量 0.9kg。

(4) 其他焊接技术。

我国电子束焊接技术也应用在如起落架、框、腹鳍、受油嘴等飞机结构件上。发动机零部件采用电子束焊接技术相对较多,如某型发动机高压压气机转子、燃烧室机匣高压涡轮组件等关键件均采用了电子束焊接技术^[13]。

我国西飞公司生产的 H6 系列飞机和 Y7 系列飞机,焊接的主要承力结构件是飞机的主起落架和前起落架零组件,焊接工艺均采用手工电弧焊接工艺。将来要制造的大型运输机,飞机起落架以及主承力梁、翼盒的结构骨架和发动机挂架等将采用焊接结构,其材料有高强度钢,也

用前景。

航天储箱结构是航天运载器(火箭、航天飞机、导弹等)的重要部件,储存燃料并承受全部的结构载荷。从航天运载器诞生至今,国外航天储箱结构材料已经发展到了第3代铝锂合金,其关键制造工艺——焊接技术已由最初的钨极氩弧焊发展到了今天的固态连接——搅拌摩擦焊。

目前,国外已成功进行搅拌摩擦焊研究的铝合金包括:2000系列(A1-Cu)、5000系列(A1-Mg)、6000系列(A1-Mg-Si)、7000系列(A1-Zn)、8000系列(A1-Li)。1998年美国波音公司的空间防御实验室将此技术用于火箭某些部件焊接。目前,ESAB公司制造的可供商业应用的搅拌摩擦焊机已于2002年安装在TWI,用来焊接尺寸为8m×5m的工件,可焊接的工件厚度达1.5~18mm。波音公司投资1500万美元进行FSW研究,焊接空间运载火箭Delta系列的助推器芯级储箱,这是美国采用FSW工艺制造的第一件产品。首件FSW储箱装在Delta II火箭上,已于1999年8月成功发射。

(2) 变极性等离子弧焊技术(VPPA)^[15,17-18]。

美国NASA马歇尔宇航中心决定采用变极性等离子弧焊技术部分取代钨极氩弧焊工艺焊接航天飞机外储箱。航天飞机外储箱材料为2218铝合金,共焊接了6400m焊缝,经100%X射线检测,未发现任何内部缺陷,焊缝质量比TIG多层焊明显提高。变极性等离子弧焊方法成功解决了2219铝合金焊接气孔问题。自此,该种焊接方法被成功用于多个航天型号的储箱结构的焊接。随后,美国又将航天储箱焊接方法转向新颖的搅拌摩擦焊方法,并将两种方法配合使用用于航天储箱生产。随着2219铝合金和2195铝锂合金的应用,在未来中厚度的大型储箱等航天构件焊接生产中,变极性等离子

焊接技术有着广阔的应用前景。

(3) 电子束焊接技术。

由于可获得优质的焊缝,真空电子束焊接技术已广泛应用于航天结构的焊接中。前苏联在储箱法兰的焊接中采用了局部真空电子束焊接技术,不需要将储箱整体置于真空室,仅将有焊缝的局部区域密封于真空中,减少了其他熔焊时局部的残余应力和变形。在未来的2219铝合金和2195铝锂合金航天器厚壁结构中,特别是在焊接残余应力和变形要求较高的法兰环缝焊接生产中,局部真空电子束焊接技术的应用对焊接质量的提高有着极为重要的意义^[19]。

采用真空电子束焊焊接钛合金气瓶可以获得质量好的焊缝,但易产生背面飞溅,焊后处理费时、费力且易产生多余物。因此,前苏联采用空心阴极焊接工艺焊接钛合金气瓶,既有较好的焊缝质量,又无背面飞溅。

俄罗斯在研制暴风雪号航天飞机的能源号运载火箭时,采用了类似2219铝合金的1201铝合金作为储箱材料,并分级分段采用了局部真空电子束焊、窄间隙高频脉冲($f=200\text{HZ}$)两面多层熔化极氩弧焊和钨极直流正极性氩弧焊等新的焊接技术^[19]。

(4) 其他焊接技术^[20-21]。

在航天焊接结构中占有重要地位的钎焊和扩散焊工艺在未来复杂结构中将会有更广阔的应用前景。为了提高效率,发动机喷注器的流道设计更精细,结构更复杂,其毛细管与法兰的钎焊控制需要更精确,以免出现熔蚀或堵塞。新型

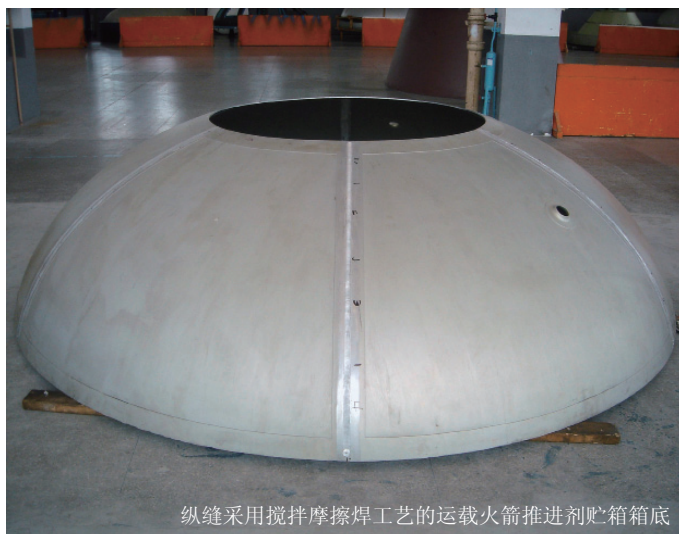
层板式喷注器结构、窝峰及波纹板夹层结构和骨架蒙皮结构等金属隔热及承力结构、B/A1管件支撑结构、钛合金与不锈钢、铝合金与不锈钢等异种金属之间,以及金属与陶瓷之间的连接结构在新型航天型号中的应用,将会拓宽先进钎焊、扩散焊和超塑扩散连接技术在航天结构中的应用面。

航天运载器上使用的发动机喷管延伸段(以下简称大喷管)是一种夹层结构,该结构由2个分开的芯组成,一个厚内衬(内壁)和一个薄外壳(外壁),内外壁采用同一种方法制成:用激光切下两块或三块平板,板的数量由板的尺寸和所做的夹层结构来定。板采用滚压成形,并沿轴线用TIG或激光焊对焊在一起。激光焊接通道管壁技术可以缩短研制和生产交付周期以及降低生产成本。

美国、英国、法国、日本以及前苏联等国家已将A-TIG技术应用于航空航天、电力、核能等重要工业领域,尤其是在前苏联,该技术已被广泛应用于航天超高强度钢容器的焊接和补焊中。

2 国内情况

近40年来,我国运载火箭技术取得了举世瞩目的进展,但以往在运载能力、可靠性等指标上和先进国家相比仍有较大的差距,难以应对空间



纵缝采用搅拌摩擦焊工艺的运载火箭推进剂贮箱箱底

发射的竞争和需求。例如在储箱材料及工艺方面,中国运载火箭技术研究院一直采用 2A14 铝合金(即 LD-10cs 铝合金)材料和两面三层钨极氩弧焊工艺,与国际水平有差距。但是,近年来,各种先进焊接技术在我国航天器构件上应用越来越广泛,

推动了我国航天事业的发展^[6,22-23]。

发动机是运载火箭的心脏,液体火箭发动机推力室由燃烧室头部喷注器组合件和身部(包括燃烧室和喷管)焊接而成。头部由层板式熔焊结构及套筒式、套圈式、管板式等的钎焊或扩散钎焊结构组成。

航天器上铣槽式和波纹板式夹层结构的零组件由氩弧焊、等离子弧焊和电子束焊完成,由于铜合金热影响区易于氧化,铜/钢夹层结构的零组件及总装件采用真空电子束焊接而成,为夹层结构钎焊或扩散焊提供洁净的零件表面。

表1 航空航天对焊接技术研究的需求

焊接技术	批生产应用与改进阶段	工程化研究及应用阶段	当前需求	未来需求
EBW	高强钢、钛合金、高温合金焊接	钛合金承力框	新材料焊接与特种焊机研制;焊接热过程和应力应变计算机模拟与仿真;大厚度钛合金焊接工艺技术	新材料焊接;低真空、非真空焊接工艺与设备
LBW		钛合金、铝合金壁板对接	钛合金、铝合金 T 型接头双光束填丝焊;宇航新材料焊接;焊缝跟踪与控制;激光电弧复合焊接技术	新材料焊接
PAW	不锈钢机匣焊接	火焰筒燃气导管空间焊缝机器人焊接跟踪与控制;高压钛合金气瓶;A-PAW 技术推广	数字化、自动化焊接;新材料焊接	自适应自动化焊接技术
IFW		异种材料的焊接	粉末合金焊接	
LFW			高温钛合金 LFW 焊接技术研究;高温合金 LFW 工艺与试验设备	粉末合金 LFW 工艺
FSW		飞机、导弹、火箭铝合金构件 FSW 应用	钛合金的 FSW;环形焊缝收孔技术;焊接与检测标准	材料表面摩擦堆焊;空间曲线焊缝 FSW
TIG 焊	钛合金、铝合金、高温合金薄壁构件精密焊接技术;专用焊接装备和焊接过程机械化;应力和变形控制	铝锂合金焊接技术;焊接全过程的质量控制	焊接资源、工艺、质量的数字化技术的集成;钛合金焊接接头延寿技术	纳米焊接材料研究;焊接过程模拟仿真
A-TIG 焊		工程应用技术	活性焊剂高效焊接技术	
VB	精密构件钎焊	热处理强化铝合金精密构件钎焊	新型材料结构的钎焊	超高温复合材料焊接方法(SHS-W)
真空电弧焊	焊接专用设备	特殊材料和构件的焊接	材料表面改性技术	
DB	精密构件扩散焊	拓宽 TLP-DB 的应用领域	ODS 高温合金层板;钛合金蜂窝壁板制造技术	金属基复合材料的扩散焊技术
焊接结构完整性研究		发动机焊接结构完整性研究	飞行器焊接结构完整性研究	适宜性原则下焊接结构寿命评定技术
发动机热端部件修理		焊接及相关技术的研究、工程化应用	焊接修复再制造完整性评定技术	

高温合金涡轮盘叶片与不锈钢叶片的连接采用了金基钎料,在氩气保护下连续顺序感应钎焊。此外,固体火箭发动机壳体、发动机泵体结构、活门波纹管组合中采用了自动氩弧焊和真空电子束焊。钛合金叶轮大都采用真空钎焊或扩散焊(钎焊)的方法,铝合金叶轮则采用炉中钎焊和气体保护钎焊。

储箱是液体火箭(导弹)的主体结构之一,用于储存燃料并承受结构载荷。我国早期采用Al-Mg系合金5A03、5A06作为第一代储箱结构材料,由于该材料的焊接性能良好,采用钨极氩弧焊单面焊双面成形的的方法焊接。

气瓶是航天器中的重要部件,用于储存高压气体,作为推进剂储箱增压或调整飞行器姿态和方向控制的动力源。钛气瓶的焊接从早期的氩弧焊、等离子弧焊到目前较普遍采用的电子束焊接工艺。此外,还采用铝合金作为气瓶或小储箱材料,形状有球形、柱形等,采用手工及自动氩弧焊或真空电子束焊接工艺。

在航天器中,需进行不锈钢、钛合金及铝合金等不同材料管子的焊接,直径从几mm到几百mm,曾经因管子焊接的质量问题,发生了飞机失事的案例。为此,原先普遍采用的手工氩弧焊工艺已逐步被自动氩弧焊、感应钎焊所代替,安装位置的焊接则已采用了自动全位置焊接工艺。在管路系统安装焊接时,管路上需钻工艺孔来实现管路内惰性气体保护,由此,发展了独特的管路工艺孔堵焊工艺。

我国在航天用压力、温度及惯性器件等传感器的细丝、薄片、膜片等结构中,采用了激光点焊、储能点焊、压焊和软钎焊等焊接工艺。不锈钢圆形环、铅环及塑料等密封件,则采用了电阻或储能对焊和热压焊等工艺。

我国航天动力技术研究院西安

航天动力机械厂率先于1996年从巴顿焊接研究所引进A-TIG焊接技术(其中包括活性剂配方和相关的焊接工艺及配套设备),用于航天超高强度容器的焊接。

另外,俄罗斯和美国已经在空间和模拟环境中进行大量电子束焊接、切割、钎焊扩散焊、热反应钎焊、太阳能焊、低压等离子弧焊接、激光焊接及搅拌摩擦焊接等多种试验及部分应用。我国急需开展这方面的研究工作,以适应我国空间事业的发展。

我国焊接技术在航空航天工业中应用的工作重点

随着航空飞机、航天器、发动机性能的提高和新型材料、新型结构的应用,促使新型焊接方法不断涌现,例如搅拌摩擦焊、变极性等离子弧焊、电子束焊、激光焊与其他焊接技术复合,这些技术不断发展,推动了我国航空航天事业的发展和进步。然而,与国外航空航天领域焊接技术相比,我们还是存在着较大的差距。在今后一段时间内,我国航空航天领域对焊接技术研究的需求是迫切的,表1按航空航天产品不同阶段对焊接技术需求列出了一些研究建议。

从整体上,今后我国航空航天焊接制造领域的工作重点是:

(1) 焊接技术在现代航空航天制造中的应用战略,必须与国家制造技术发展的总体思路相结合,以符合我国国情为出发点,既要借鉴国外焊接技术在飞机、发动机及航天器制造中的成功经验,又要借鉴他们在焊接结构应用的谨慎的设计思想,与设计工艺紧密配合;

(2) 建立焊接工艺数据库(含资源管理、工艺文件),实现各种厚度结构件焊接过程中焊缝收缩及应力应变的仿真技术,进一步加强焊接结构完整性及可靠性评定技术研究;

(3) 加速新型焊接方法的应用研究。尽快掌握激光双光束填丝焊、

搅拌摩擦焊、线性摩擦焊、活性剂-气保护弧焊等新工艺,完善性能数据,掌握最佳焊接工艺及其流程,促进新型焊接方法在航空航天器上的应用;

(4) 重视1421、1460、2195铝锂合金,6013、6056铝镁硅合金,Ti55、Ti60高温钛合金,SP-700、Ti153、 β 21S、Ti17高强高韧钛合金等轻合金在先进焊接工艺上的开发和应用;

(5) 掌握ODS材料、粉末高温合金及金属间化合物的扩散连接工艺,关注各类蜂窝结构(如全点焊高温合金蜂窝壁板、LID-DB钛合金蜂窝壁板)制造技术及其应用;探索热塑性树脂基复合材料、金属基复合材料、工程陶瓷及陶瓷基复合材料以及C/C复合材料的连接技术;

(6) 进一步扩大电子束焊接技术的应用,解决塑性较差的高强钛合金、超高强钢以及大厚度材料框和盒形梁等结构的焊接工艺;

(7) 气保护焊、等离子弧焊要向数字化技术靠拢,提高自适应控制能力(弧长调节、焊缝跟踪及轨迹控制、焊枪方位及熔透控制等);

(8) 建立并不断改进完善航空航天结构件的焊接数字化生产线。

结束语

“大飞机”计划、拥有自主知识产权的ARJ21飞机、“神七”宇宙飞航、“嫦娥奔月”计划、载人航天工程、新一代大型运载火箭及新型卫星等航空航天型号的需求,牵引着航空航天焊接技术的发展,先进焊接技术在航空航天中的应用也必然推动航空航天型号的发展。相信中国的航空航天焊接技术在需求牵引、技术推动的相互作用下,一定会取得快速进步。

本文有参考文献23篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请与本刊编辑部联系。

(责编 晓霏)